

胡雅君, 刘屹岷, 吴琼, 等. 2017. 影响江南春雨年际变化的前期海洋信号及可能机理 [J]. 大气科学, 41 (2): 395–408. Hu Yajun, Liu Yimin, Wu Qiong, et al. 2017. Preceding oceanic influences on the inter-annual variation of spring persistent rain in Jiangnan of China and the possible mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (2): 395–408, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1605.16133.

影响江南春雨年际变化的前期海洋信号及可能机理

胡雅君^{1,2} 刘屹岷¹ 吴琼³ 王晓春³

1 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 南京信息工程大学海洋科学学院, 南京 210044

摘 要 基于诊断, 本文计算了 1982~2014 年江南春雨的开始时间、结束时间和总降水量, 分析了江南春雨的气候特征和年际变化, 探讨了前冬 Nino3.4 区域海温异常与江南春雨的联系及可能机理。结果表明, 江南春雨的起止时间和总降水量都具有显著的年际变化, 前冬赤道东太平洋海温与江南春雨总量存在显著的正相关。前冬 Nino3.4 指数为正时, 一方面通过 Walker 环流在赤道 120°E 附近区域激发出异常下沉运动以及低层异常反气旋, 增强了南海地区低层西南气流以及水汽输送, 另一方面与东太平洋海温变化相联系的印度洋增暖在赤道印度洋引发低层东风和孟加拉湾北部反气旋环流异常, 进一步增强了江南地区的水汽输送; 高层南亚地区则存在西风异常, 对应江南上空辐散和抽吸作用加强, 导致上升运动进一步增强, 使得江南春雨总量增加; 前冬 Nino3.4 指数为负时则次年春雨偏少; 并且前冬 El Niño 事件的强度对春雨异常也有影响, 前冬 El Niño 强(弱)的年份, 海温异常的信号能(不能)持续到春季, 江南春雨总量通常偏多(偏少)。另外, 加入了前冬南极涛动指数和印度洋海盆一致模所建立的江南春雨总量的多元线性回归方程, 其回归结果比基于单独的 Nino3.4 指数能更好地反映江南春雨的异常, 可用于季节预测。

关键词 江南春雨 年际变化 Nino3.4 指数 El Niño 强度 季节预测

文章编号 1006-9895(2017)02-0395-15

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1605.16133

Preceding Oceanic Influences on the Inter-annual Variation of Spring Persistent Rain in Jiangnan of China and the Possible Mechanism

HU Yajun^{1,2}, LIU Yimin¹, WU Qiong³, and WANG Xiaochun³

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on analysis of observations, we defined the starting and ending time and the total rainfall of the spring persistent rainfall in Jiangnan of China (SPRJ) from 1982 to 2014, and investigated the climatic characters of the SPRJ as

收稿日期 2016-02-05; 网络预出版日期 2016-06-22

作者简介 胡雅君, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候动力学研究。E-mail: huyajun@lasg.iap.ac.cn

通讯作者 刘屹岷, E-mail: lym@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41328006, 海洋专项 XDA11010402, 南京信息工程大学启动经费项目 S8113046001, 2015 江苏双创团队, 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 41328006), Marine Special Project (Grant XDA11010402), Start-up Project Foundation of NUIST (Grant S8113046001), Jiangsu Innovative and Entrepreneurial Team, Advanced Subjects Foundation of Jiangsu Colleges and Universities (PAPD)

well as its interannual variation. The relationship between the SST anomaly of Nino3.4 region in the preceding winter and the SPRJ and its physical mechanism were further studied. Results show that there is a significant positive correlation between the preceding winter Nino3.4 index and total SPRJ. The warm water can trigger an anomalous Walker circulation that leads to significant abnormal descending motions and corresponding low-level anticyclonic circulation near 120°E at the equator. The strengthened southwesterly winds of the anticyclone in the low level of the South China Sea facilitate more water vapor transport from the South China Sea to Jiangnan of China. On the other hand, the Indian Ocean SST anomaly associated with El Niño events can induce abnormal low level easterly winds in tropical Indian Ocean and anticyclone in the north of the Bay of Bengal, which also promotes the water vapor transportation. Meanwhile, the westerly anomalies in the upper troposphere above South Asia enhances divergence and pumping above Jiangnan of China, and thus are favorable for ascending motions and more SPRJ. In contrast, there is less SPRJ following a La Niña event. Moreover, the influence of El Niño on the SPRJ changes with its original intensity. With a strong El Niño in the preceding winter, the SSTA in the Pacific can persist to the following spring and there will be more SPRJ rainfall; with a weak El Niño in the preceding winter, however, the SSTA in the Pacific cannot persist to the following spring and the SPRJ total rainfall will decrease. Besides, when considering the combined effects of Nino3.4 index and Antarctic Oscillation Index and Indian Ocean Basin Mode of the preceding winter, the seasonal prediction is improved. Thus the multiple linear regression of the three predictors is useful for the prediction of the SPRJ.

Keywords Spring persistent rainfall in Jiangnan of China, Interannual variation, Nino3.4 index, El Niño intensity, Seasonal prediction

1 引言

江南春雨是中国乃至东亚地区最早出现的雨季,通常是指我国南方(长江中下游以南地区)春季发生的一种连续阴雨天气,具有明显的年际变率,致使旱涝灾害频繁,影响春播;并且江南地处南海副热带高压西北侧和青藏高原东南侧,江南春雨还涉及独特的海—陆—气相互作用。

20 世纪 50 年代以来,国内对春雨的研究多数着眼于对春季连续阴雨的天气学或中短期预报的研究(高由禧等,1962;李麦村等,1977;包澄澜,1987;叶愈源,1993;吴宝俊和彭治班,1996)。Tian and Yasunari (1998)首次将江南春雨作为气候事件提出,将江南春雨期定为第 12~26 候,空间范围取为 25°~30°N,并指出其气候成因在于西部中南半岛与东部西太平洋至菲律宾之间的热力对比,称为春季季节增暖的时滞效应。万日金和吴国雄(2006)通过诊断分析和敏感性数值模式试验证明,江南地处青藏高原东南侧的强劲西南风风速中心的下游,具有强烈的风速和水汽辐合,直接导致江南春雨的形成,而该西南风不仅由高原机械强迫绕流造成,也与高原热力作用形成的气旋性低压环流有关。随后又通过研究降水、环流形势的演变和高原感热加热等特征的明显变化,将江南春雨建立和终结时间定为全年第 13 候和全年第 27 候,其中结束时间与南海季风爆发时间有关;以平均 6 mm d⁻¹ 的雨强为标准将其空间范围定为 30°N 以

南、110°E 以东、雷州半岛以北的中国东南部地区(万日金和吴国雄,2008)。

关于我国春季降水的影响因子分析及预测研究很多,尤其是前期冬季和春季太平洋海温异常对其年际变率的影响(邓立平和王谦谦,2002;陈绍东等,2003;陈艺敏和钱永甫,2005;万日金等,2008b;马慧等,2009;张博等,2011;Feng and Li, 2011;强学民和杨修群,2013)。近年来,青藏高原东南部植被变化、前冬南半球环状模、印度洋海温异常和西太平洋暖池热含量也被提出用于春雨的预报(周定文等,2009;郑菲和李建平,2012;陈丹等,2012;尚可等,2013,2014;程慧萍和贾晓静,2014)。但是这些研究中,有的使用华南前汛期降水,有的使用 3~5 月或 13~27 候降水。由于江南春雨的开始与结束时间均存在明显的年际变化,固定起止时间会使得江南春雨总量的计算并不准确,影响其年际变化的研究。

本文将计算每年的江南春雨起止时间及其对应的总降水量,分析其年际变化特征,再从热带海洋的影响入手,寻找前期关键区域及其影响机制,并结合其他年际变化的影响因子,建立多元线性回归方程,为江南春雨的气候预测提供参考依据。

2 资料和分析方法

本文使用了国家气象信息中心提供的 1982~2014 年中国地面降水日值 0.5°×0.5°格点数据集

(V2.0), JRA55 逐日位势高度场、风场、比湿、垂直速度场等 (Kobayashi et al., 2015), NOAA 1982~2013 年逐日向外长波辐射 (OLR) 资料 (Liebmann and Smith, 1996), OISST 海温逐月资料 (Reynolds et al., 2007)。Nino3.4 指数来自 http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/Nino34/index.html [2016-02-05]; PNA (太平洋—北美型遥相关), AO (北极涛动), AAO (南极涛动), NAO (北大西洋涛动) 指数来自 http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/teleconnections.shtml [2016-02-05]; EMI (El Niño Modoki 指数), DMI (印度洋偶极子指数) 来自 <http://www.jamstec.go.jp/frcgc/research/d1/iod/e/index.html> [2016-02-05], IOB (印度洋海盆一致模) 指数为热带印度洋海温的经验正交函数 (EOF) 第一主模态的时间序列 (胡俊, 2014)。

江南春雨的开始时间参照万日金等 (2008a) 的标准: 每年从 2 月即全年第 7 候开始, 江南地区 ($23^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 候平均降水量不小于 4 mm d^{-1} , 同时其上游区域 ($20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$) 850 hPa 候平均西南风速不小于 4 m s^{-1} , 并且在紧接其后的 3 候中至少有 1 候满足上述条件, 则认为该候为江南春雨建立的初始时间。结束时间定为南海季风爆发前一候 (万日金和吴国雄, 2008), 南海季风爆发日期的标准 (Mao et al., 2004) 是中国南海 ($5^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 对流层上层 ($200\sim 500\text{ hPa}$) 的经向温度梯度 (MTG) 的区域平均值由负变为正并且经向温度梯度 (MTG) 的正值维持至少 6 天, 将每年首次满足以上两个条件的那一天定为南海季风爆发的日期。江南春雨总量即为每年开始时间到结束时间内江南地区区域平均的总降水量。

研究中采用的分析方法主要包括相关分析和回归分析以及建立多元线性回归方程, 为了突出年际变化, 做以上分析前所有变量均去掉线性趋势。相关分析和回归分析的显著性检验均用 t 检验, 多元线性回归方程的显著性检验用 F 检验。

本文还参考苗秋菊等 (2005) 的方法计算了江南地区西、东、北、南四个边界的低层 (地表到 700 hPa 垂直积分) 水汽输送通量, 分别记为 QW、QE、QN、QS。江南地区总的水汽收支为 $Q = QW - QE + QS - QN$, 若 $Q < 0$, 则江南地区流出的水汽大于流入的水汽, 表明有水汽辐散; 若 $Q > 0$, 则流入的

水汽大于流出的水汽, 表明有水汽辐合。

3 江南春雨的气候特征

根据江南春雨开始、结束时间的定义, 计算出 1982~2014 年每年的起止时间 (图 1, 红色代表大于平均值, 蓝色代表小于平均值)。从图中可以看到, 江南春雨最早建立于第 7 候 (1992、1997、1998、2010 年), 最晚开始于第 25 候 (2011 年), 平均为 12.4 候, 标准差为 4.1 候; 结束时间最早在第 21 候 (2009 年), 最晚在第 31 候 (1991 年), 平均为 25.9 候, 标准差为 2.1 候。将每年开始时间到结束时间记为每年的春雨期, 春雨期的候数记为持续时间, 33 年中最长持续 22 候 (1985、1998、2010 年), 最短仅存在 1 候 (2011 年), 即开始与结束在同一候, 本文认为这一年没有江南春雨 (后面分析中均排除 2011 年), 33 年平均为 14.5 候, 标准差为 5.0 候。可以看到, 虽然开始、结束、持续时间的气候平均与前人研究类似, 但三者的年际变化特征非常明显。开始时间最早与最晚可相差 18 候, 结束时间最大差距可达 10 候, 且开始时间的年际变率要比结束时间的更大。计算表明, 江南春雨的开始时间、结束时间以及持续时间均没有显著线性趋势。另外, 开始时间和结束时间的相关系数为 -0.23 , 没有通过显著性检验, 表明南海季风爆发时间与江南春雨建立早晚关系不大。

图 2a 是使用了本文定义的起止时间计算出的多年平均春雨期总降水量, 可以看到大值区位于长江中下游以南的我国东部地区 (黑色方框, $23^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$), 正是本文研究的江南春雨空间范围, 这与万日金等 (2008b) 1951~2000 年第 13~27 候日平均降水量分布基本一致。将图 2a 方框内每年的总降水量做区域平均, 得到图 2b 中的实线序列, 与固定起止时间 (13~27 候) 的江南春雨总量序列 (虚线) 相比, 两者差异明显。前者年际变化更突出, 其平均值为 437.98 mm , 标准差为 136.10 mm , 总降水量最少的是 2008 年 (234.01 mm), 其负异常为标准差的 1.50 倍, 最多的是 1992 年 (769.04 mm), 其正异常为标准差的 2.43 倍。从图 2c 可以看出, 江南春雨总量占当地年降水量的比重超过 25%, 最大可达 35%, 由此可见, 江南地区春雨总量占年降水量的比重大, 其年际变率也比较大, 容易发生旱涝灾害, 进而影响春季播种。

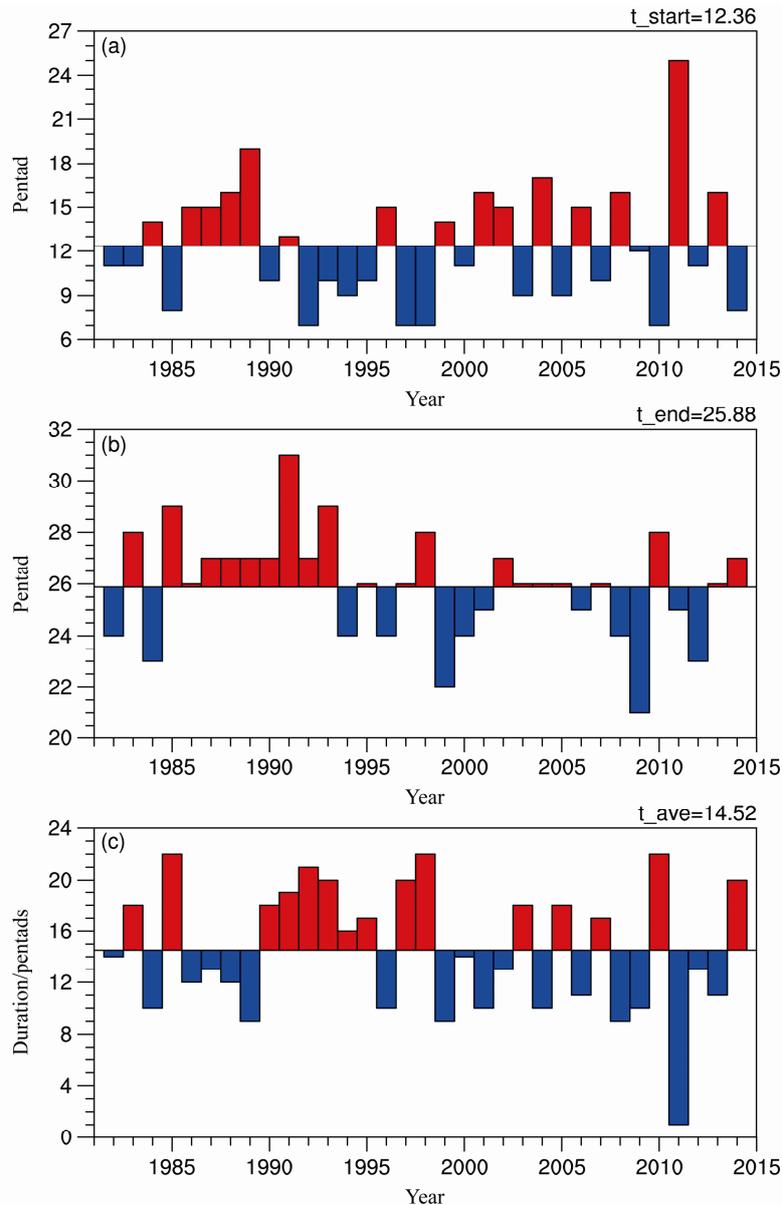


图1 江南春雨 (a) 开始时间、(b) 结束时间和 (c) 持续时间 (单位: 候)

Fig. 1 The (a) starting and (b) ending time of the spring persistent rainfall in Jiangnan of China (SPRJ) and (c) the duration (units: pentads)

4 江南春雨与前冬热带海温的关系

4.1 前冬热带海温影响江南春雨的关键区

前人的研究结果指出, 前期冬季热带海温异常对西北太平洋和东亚地区春季的环流和降水有指示作用 (万日金等, 2008a; Chen et al., 2008)。图 3a 给出了江南春雨总量序列与前期冬季热带海温的相关系数, 可以看到 Nino3.4 区域 (黑色方框) 为相关系数大值区, 最大超过 0.70, 表明春雨与前期冬季 ENSO 事件密切相关。所以将 Nino3.4 区域

作为前冬热带海温影响江南春雨的关键区。再用前期冬季 Nino3.4 指数序列回归我国东部春雨期总降水量, 如图 3b, 回归系数最大值集中在本文研究的江南地区, 并且通过 0.01 显著性检验。

4.2 前冬 Nino3.4 区域海温与春雨期大气环流异常

导致降水异常的根本原因是大气环流异常。为了理解前期冬季 Nino3.4 区域海温异常与江南春雨的联系, 本文分别计算了春雨期大气平均环流场 (每年春雨期平均后再计算 33 年平均) 和前冬 Nino3.4 指数序列回归的春雨期大气环流异常场。

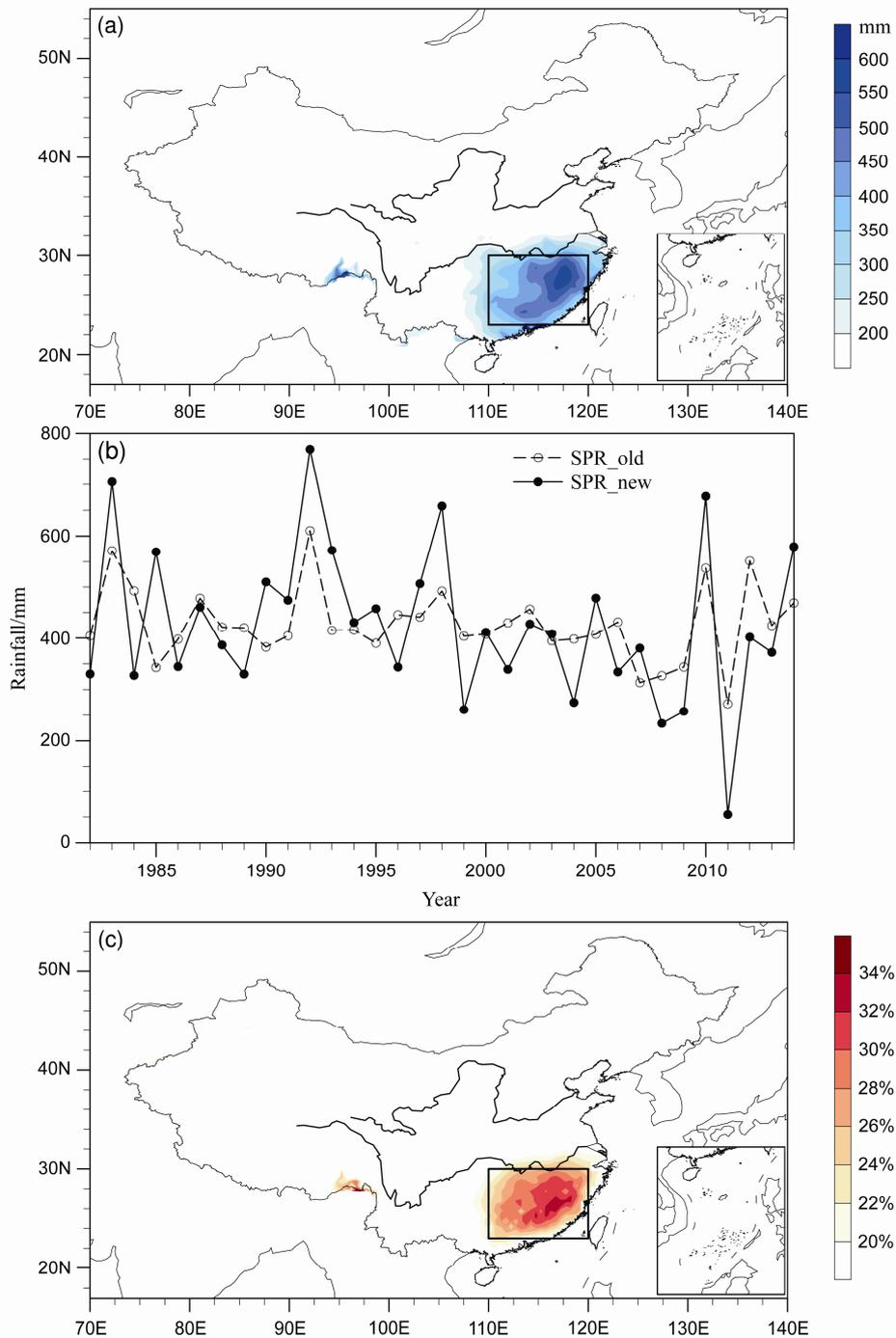


图2 (a) 1982~2014 年平均春雨期总降水量 (单位: mm), (b) 1982~2014 年江南春雨总量序列 (实线: 起止时间有年际变化; 虚线: 起止时间 13~27 候, 单位: mm), (c) 1982~2014 年春雨总量占全年总雨量的比重

Fig. 2 (a) Climatological (1982–2014) cumulative rainfall during the SPRJ (units: mm), (b) time series of regionally mean cumulative rainfall (solid line: with year-to-year onset and end times; dashed line: over the 13th–27th pentads) in Jiangnan of China, (c) percentage of annual total rainfall accounted for by cumulative rainfall during the SPRJ averaged over 1982–2014

图 4a 给出了 1982~2014 年春雨期 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场平均分布。可以看到, 500 hPa 高度场上, 我国东北地区至日本海附近存在东亚大槽, 850 hPa 风场上, 青藏高原东南侧存在一支西

南气流, 这支西南气流可以将菲律宾和我国南海地区的水汽输送到江南地区, 同时在 30°N 以北区域存在明显的西北气流, 表明春雨期北方的冷空气活动较为频繁。南海暖湿气流以及北方冷空气在江南

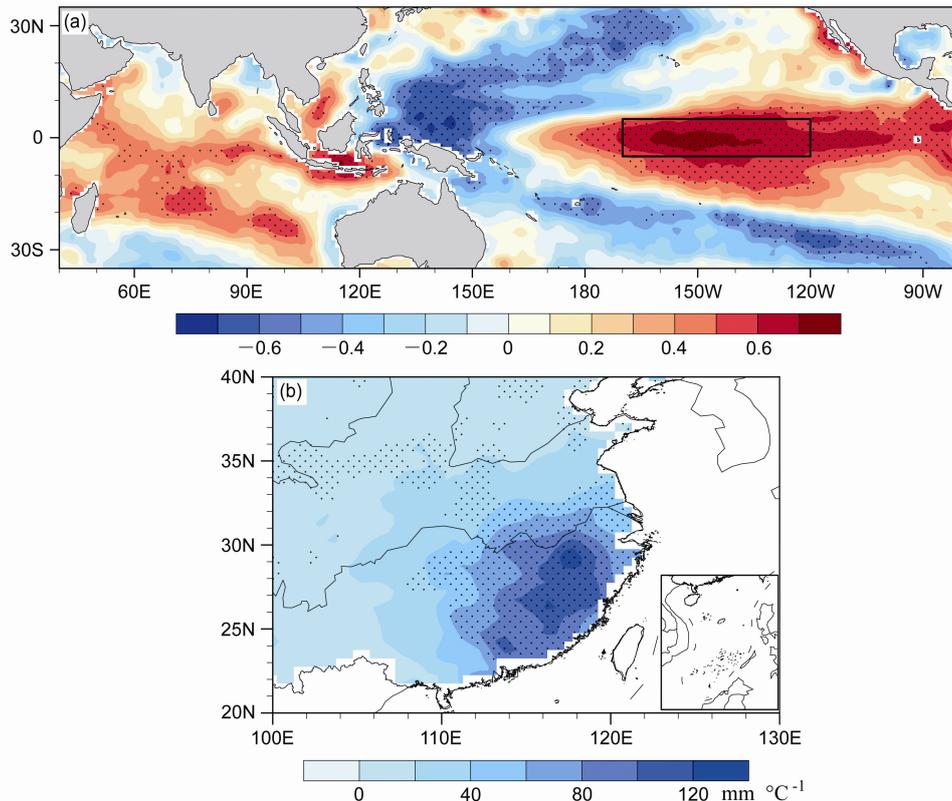


图3 (a) 1982~2014年江南春雨总量与前期冬季 SST 的相关系数, 打点区通过 0.05 显著性检验; (b) 前期冬季 Nino3.4 指数序列回归的春雨总降水量 (单位: $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1}$), 打点区通过 0.01 显著性检验

Fig. 3 (a) Distribution of correlation coefficient between cumulative rainfall of the SPRJ and SST in the preceding winter over 1982–2014, the dotted regions are for values passing the significant test at 0.05 level; (b) cumulative rainfall during the SPRJ period regressed upon the Nino3.4 index in the preceding winter over 1982–2014 (units: $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1}$), the dotted regions are for values passing the significant test at 0.01 level

地区交汇, 能够导致持续的降水。图 4b 为前冬 Nino3.4 指数回归的 850 hPa 风场分布, 可以看到, 当 Nino3.4 区域海温异常偏高时, 在赤道东太平洋存在一支明显的偏西气流, 菲律宾地区出现异常反气旋, 该反气旋的左侧伸出一支显著的偏南气流, 从南海延伸至我国江南地区, 有利于水汽输送; 在赤道印度洋存在东风异常, 孟加拉湾北部存在反气旋环流异常, 进一步增强了江南地区的水汽输送。

具体分析春雨期江南地区低层(地表到 700 hPa 垂直积分)各边界上的水汽输送通量以及总水汽收支。如图 5a, 可以看到, 江南地区在春雨期确实有水汽辐合, 在南边界和西边界输入水汽, 在北边界和东边界有水汽的输出, 其中南边界的水汽输入量最大, 东边界的水汽输出量最大, 水汽输入总和大于水汽输出总和, 净输入为 $56.42 \times 10^6 \text{ kg s}^{-1}$, 江南地区春雨期的水汽最主要来自南边界(张洁等, 2009)。从各边界的水汽输送通量异常与前冬

Nino3.4 指数的回归系数(图 5b)可以看到, Nino3.4 指数为正时, 西边界和南边界有异常的水汽输入, 东边界和北边界有异常的水汽输出, 但输入大于输出, 江南地区有异常的水汽辐合, 并且主要原因是南边界的水汽输入增加。

从 OLR 场看(图 6a), Nino3.4 指数为正时, 赤道东太平洋 OLR 有负异常, 对流活动增强, 西太平洋和海洋大陆 OLR 有正异常, 对流活动减弱。从垂直速度场(图 6b)可以看到, 由于 Nino3.4 区的海温出现正异常, 激发了异常的 Walker 环流, 上升支在赤道东太平洋, 下沉支在赤道西太平洋和海洋大陆, 有利于加强菲律宾异常反气旋, 进而加强青藏高原东南侧的西南风。此外, 图 6c 给出了沿 $110^\circ \sim 120^\circ\text{E}$ 平均的垂直速度与前期冬季 Nino3.4 的回归系数, Nino3.4 指数为正时, 垂直速度在低纬地区有正异常, 表明有异常的下沉运动, 而在江南地区确有负异常, 表明有异常的上升运动, 有利于水汽抬升凝结。

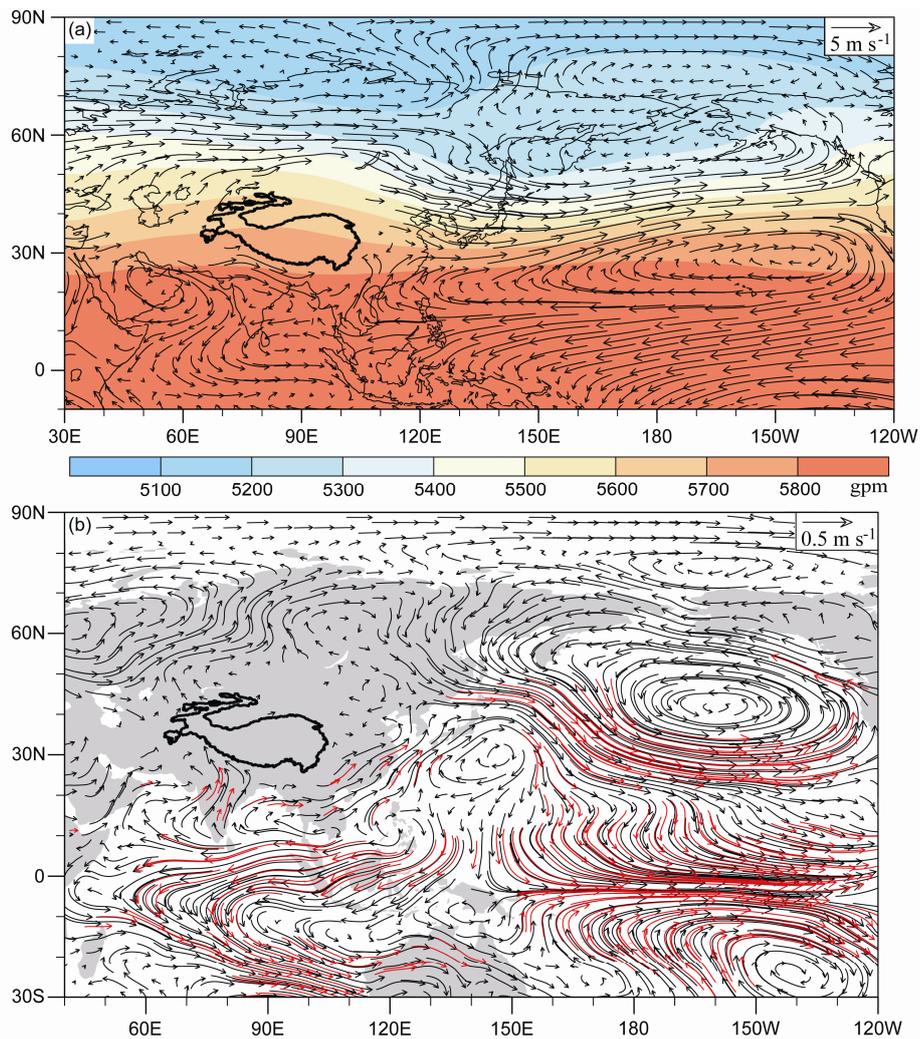


图 4 (a) 1982~2014 年春雨期 850 hPa 风场 (黑色矢量, 单位: m s^{-1}) 和 500 hPa 高度场 (阴影, 单位: gpm), (b) 春雨期 850 hPa 异常风场对前期冬季 Nino3.4 指数的回归系数 (单位: $\text{m s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), 红色箭头通过 0.05 显著性检验
Fig. 4 (a) The climatological mean winds at 850 hPa (black vectors, units: m s^{-1}) and 500 hPa geopotential height (shading, units: gpm) during the SPRJ of 1982–2014, (b) anomalies of 850 hPa wind during the SPRJ regressed upon the Nino3.4 index in the preceding winter (units: $\text{m s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), red vectors indicate the anomalies that are statistically significant at the level of 0.05

另外, 从 200 hPa 纬向风场来看, 在我国东海至日本上空存在西风急流中心 (图 7a), 由于地转偏差的作用, 在急流入口区右侧和急流出口区左侧会形成高层辐散, 能加强该区域的上升运动以及低层辐合, 春季江南地区正好处在急流入口区的右侧, 也有助于水汽的抬升。而当 Nino3.4 指数为正时, 长江以南地区为西风异常, 该异常位于西风急流的西南侧 (图 7b), 相应的高层辐散增强, 抽吸作用加强, 使得江南地区上升运动进一步增大, 有利于降水增加。

4.3 前冬 El Niño 的强度对江南春雨异常的影响

虽然江南春雨与前期冬季 Nino3.4 指数有着很

好的相关关系, 并且能通过大气环流异常解释前者与后者相关, 但是存在诸如 2014 年等一些例外 (图 8), 如果要用于气候预测, 仅仅依据 Nino3.4 指数, 容易预报错误。所以研究特殊的不一致年份, 了解其成因, 显得非常重要。

对江南春雨总量序列去除线性趋势, 再进行标准化处理, 定义为江南春雨指数。前冬 Nino3.4 指数和江南春雨指数的时间序列的相关系数为 0.69, 所以两者符号一致的年份被称为一致年, 符号相反的年份称为不一致年。如图 8 所示, 1982 年以来, 12 次极端降水异常年 (江南春雨指数的绝对值大于 1) 中除了 1982 年和 2014 年, 其它 10 次极端降水

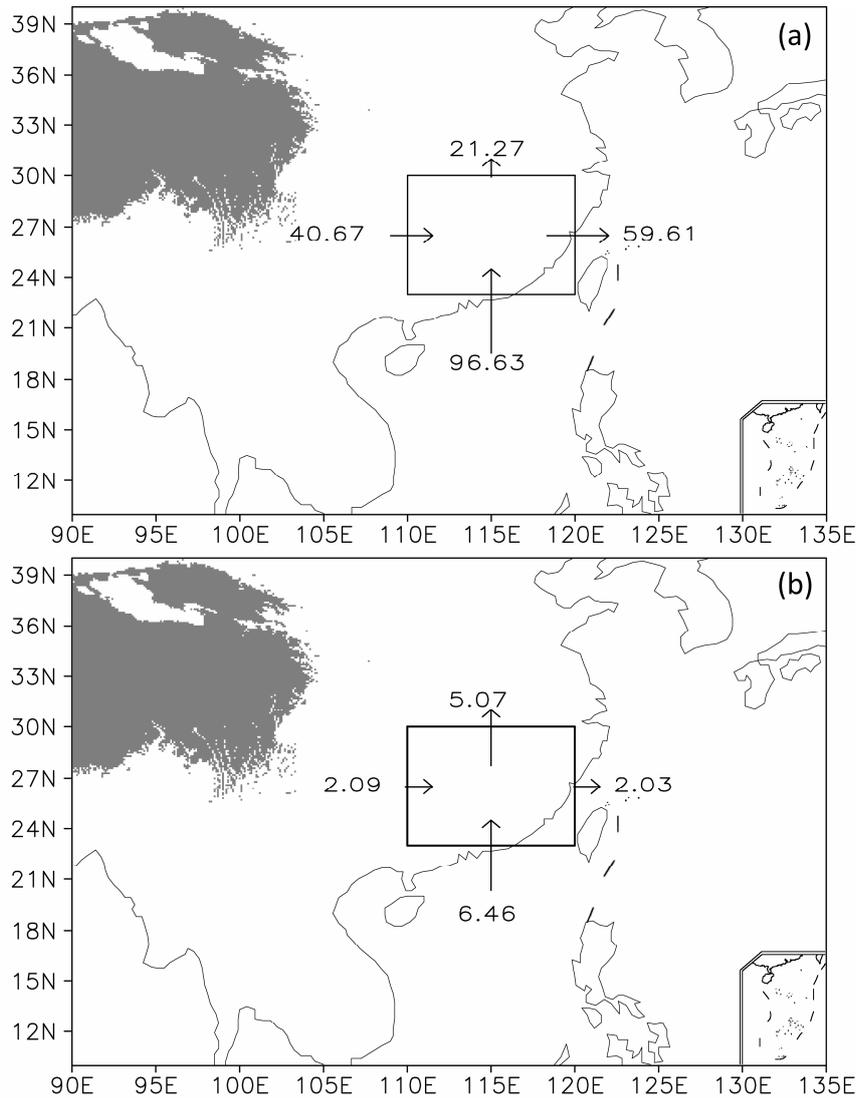


图5 (a) 1982~2014年江南地区春雨期低层水汽收支的气候态(单位: 10^6 kg s^{-1}), (b) 春雨期各边界低层水汽输送对前期冬季 Nino3.4 指数的回归系数(单位: $10^6 \text{ kg s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

Fig. 5 (a) The climatological mean of low layer water vapor budget during the SPRJ of 1982–2014 (units: 10^6 kg s^{-1}), (b) anomalies of low layer water vapor budget during the SPRJ regressed upon the Nino3.4 index in the preceding winter (units: $10^6 \text{ kg s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

异常年的前冬均呈现出相应的 ENSO 事件, 但 1982 年和 2014 年东太平洋海温也出现了对应符号的海温异常, 虽然未达到 ENSO 事件的强度。根据图 8, 并结合 ENSO 的定义(http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml [2016-03-26]), 挑选出 El Niño 年和 La Niña 年, 表 1 给出了具体的一致年份和不一致年份。可见 10 次暖事件的次年有 6 次春雨偏多但 4 次偏少; 7 次冷事件的次年春雨 6 次偏多, 1 次偏少。因此赤道东太平洋冷事件对于江南春雨总量异常的预测技巧更高。可能的原因是在冷事件情形下, 赤道西太

平洋的暖池地区对应正海温异常, 对流偏强; 强的对流比被压制的对流能更为有效地产生环流异常, 影响我国江南地区。

表 1 El Niño 年与 La Niña 年分类

Table 1 Years of El Niño and La Niña

	El Niño 年份	La Niña 年份
一致年	1983, 1992, 1998, 2003, 2005, 2010	1989, 1996, 1999, 2000, 2001, 2008
不一致年	1987, 1988, 1995, 2007	1985

由于 ENSO 存在季节“锁相”关系, 即绝大多数 El Niño (La Niña) 事件倾向于在北半球的春季

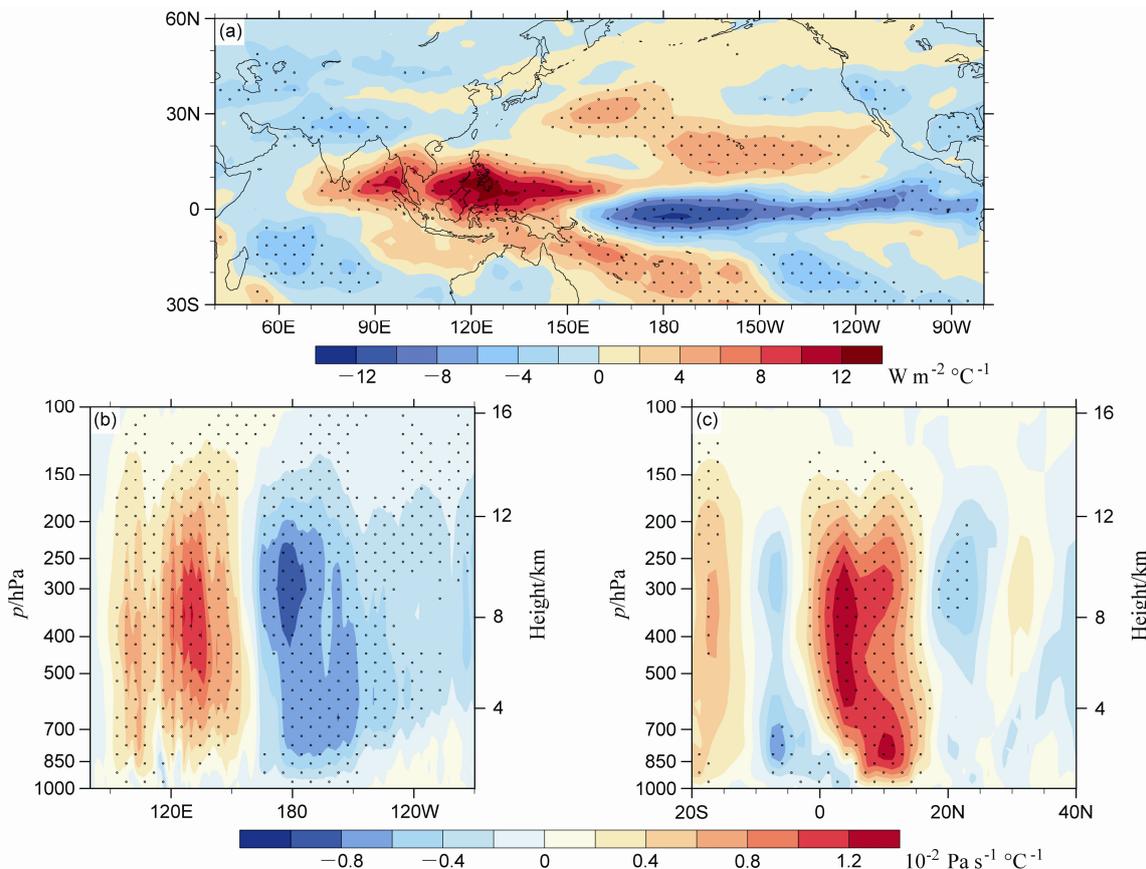


图 6 春雨期 (a) 向外长波辐射 (OLR) (单位: $\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)、(b) 沿 $10^\circ\text{S}\sim 10^\circ\text{N}$ 平均的垂直速度 ω (单位: $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)、(c) 沿 $110^\circ\sim 120^\circ\text{E}$ 平均的垂直速度 ω (单位: $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) 异常场对前期冬季 Nino3.4 指数的回归系数, 打点通过 0.05 显著性检验
Fig. 6 Regressions of anomalous patterns during the SPRJ for (a) OLR (units: $\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), (b) vertical velocity averaged over $10^\circ\text{S}\sim 10^\circ\text{N}$ (units: $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), (c) vertical velocity averaged over $110^\circ\sim 120^\circ\text{E}$ (units: $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) with respect to the Nino3.4 index in the preceding winter. The dotted regions are for values that are statistically significant at the level of 0.05

开始出现, 在北半球的冬季达到峰值, 然后再逐渐减弱, 所以猜测这些不一致的年份可能与前冬 ENSO 的强弱及其持续程度有关。将前冬 Nino3.4 指数大(小)于 1.0 (-1.0) 的 ENSO 年份定义为强 El Niño (La Niña) 年。图 9 分别考察了这四类年份的 Nino3.4 指数从前期 12 月到当年 5 月的变化, 从中可以清晰地看到, 几乎所有年份的 ENSO 强度从前期 12 月到当年 5 月都存在衰减。一致的 El Niño 年份, 前冬暖事件强, 12 月份的 Nino3.4 指数平均达 1.7°C , 除了 2005 年低于 1.0°C , 其余 5 年都超过 1.4°C , 并且均为强 El Niño 年; 到 5 月份, 除了 2003 年和 2010 年, 其他四年 Nino3.4 指数仍在 0.5°C 附近 (图 9a), El Niño 信号得以持续。不一致的 El Niño 年一共 4 年, 前冬暖事件较弱, 12 月份的 Nino3.4 指数平均为 1.0°C , 冬季平均都小于 1.0°C ; 到 5 月份, Nino3.4 指数变为负值的年份有 3 年,

其中 1988 年已小于 -1.0°C , 使春雨总量偏少 (图 9b), 但 1987 年从冬到春东太平洋维持较强的暖距平, 春雨总量却接近气候平均。一致的冷事件与暖事件相似, 除了 1996 和 2001 年, 其他均为强 La Niña 年; 5 月份的 Nino3.4 指数, 除了 2001 年在 -0.22°C , 其他年都仍低于 -0.5°C (图 9c)。但不一致的 La Niña 年, 即 1985 年 (图 9d), 东太平洋维持较强的冷海温而春雨总量偏多。1985 和 1987 这两年江南春雨与海温不一致的原因需要进一步研究。

5 江南春雨的多因子线性回归

为了预测江南春雨总量, 除了上述 Nino3.4 指数, 本文还计算了研究年际变化时常用到的 7 种前期信号与江南春雨总量的超前相关, 包括 PNA, NAO, AAO, AO, EMI, DMI, IOB。图 10 给出了这些指数从前一年 3 月份到当年 5 月份与江南春

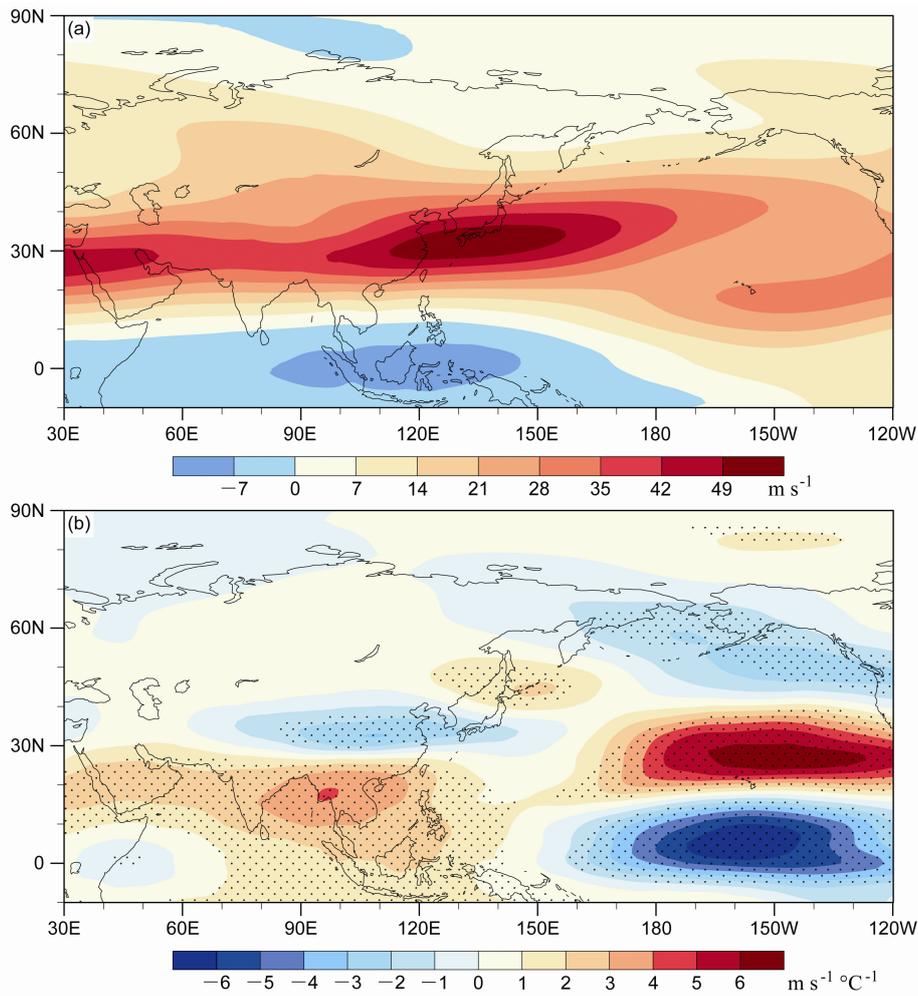


图7 (a)1982~2014年春雨期200 hPa 纬向风(单位: m s^{-1}), (b)春雨期200 hPa 异常纬向风对前期冬季 Niño3.4 指数的回归系数(单位: $\text{m s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), 打点通过 0.05 显著性检验

Fig. 7 (a) The climatological mean 200 hPa zonal wind during the SPRJ periods of 1982–2014 (units: m s^{-1}), (b) anomalies of 200 hPa zonal wind during the SPRJ period regressed upon the Niño3.4 index in the preceding winter (unit: $\text{m s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), the dotted regions are for values that are statistically significant at the level of 0.05

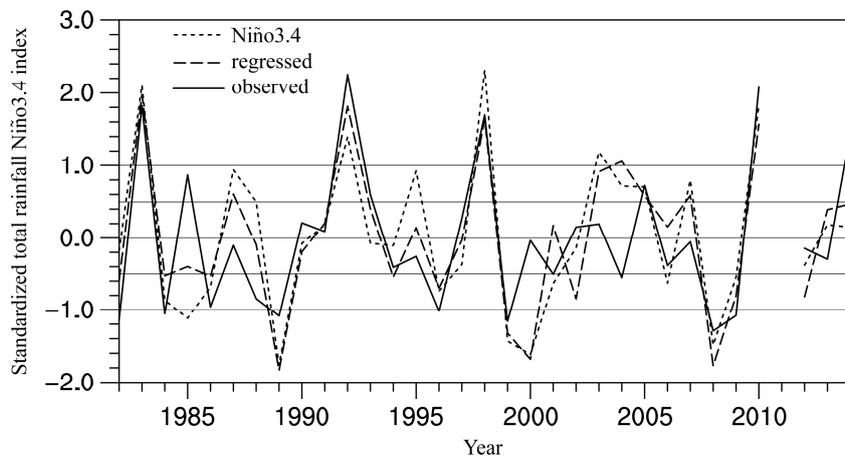


图8 利用 Niño3.4 指数、IOB 指数和 AAO 指数多元线性回归的江南春雨总量(虚线)、实际江南春雨总量(实线)的标准化序列和前期冬季 Niño3.4 指数序列(点线)

Fig. 8 Standardized time series of regressed total rainfall by Niño3.4 index, IOB index and AAO index (dashed line), observed total rainfall (solid line) during SPRJ period, and the Niño3.4 index in the preceding winter (dotted line)

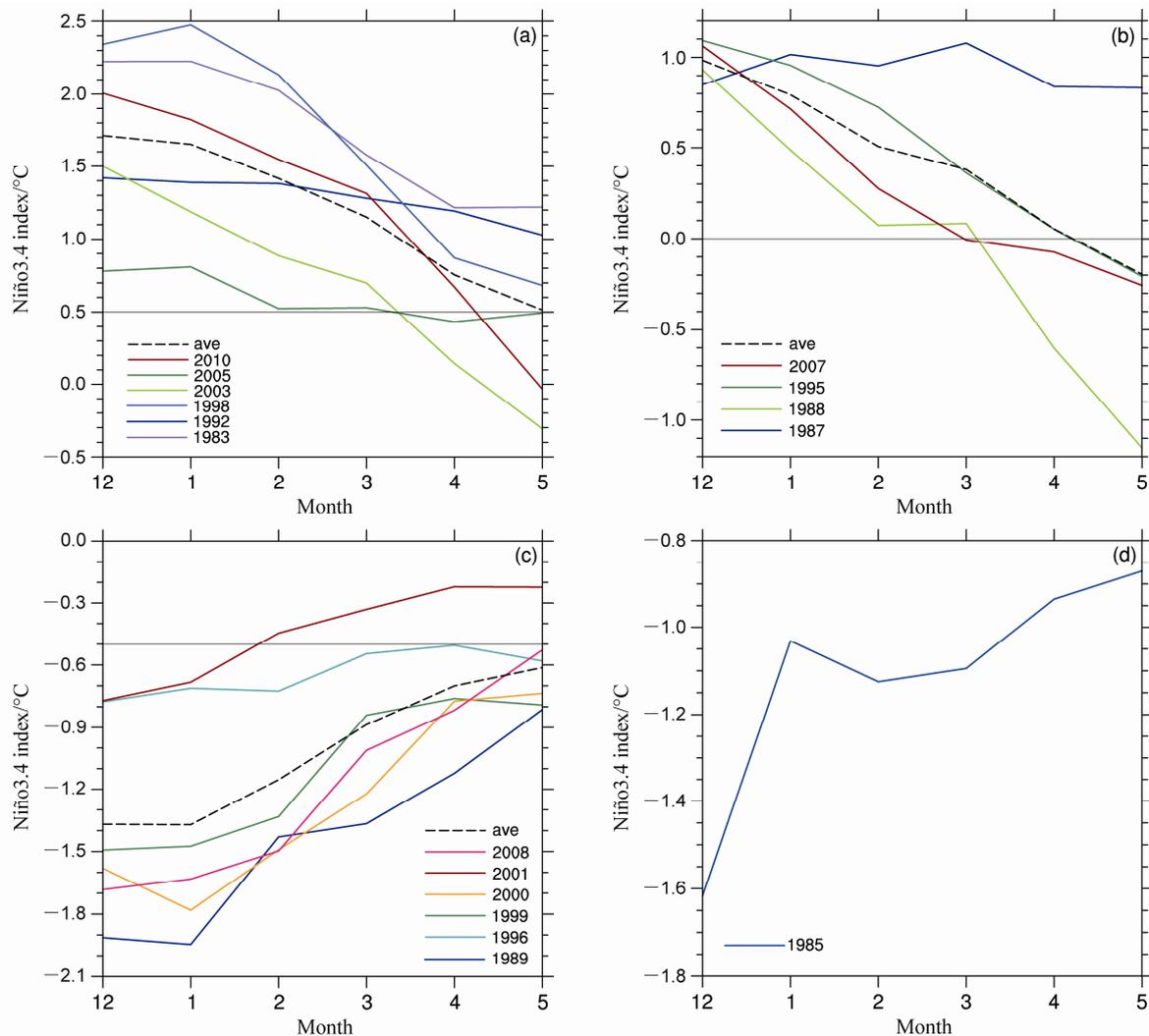


图9 前期12月至当年5月Nino3.4指数的变化(单位: °C): (a) 一致El Niño年份; (b) 不一致El Niño年份; (c) 一致La Niña年份; (d) 不一致La Niña年份

Fig. 9 The evolution of Nino3.4 index (units: °C) from December of the preceding years to May of the current years for (a) consistent El Niño years, (b) inconsistent El Niño years, (c) consistent La Niña years, (d) inconsistent La Niña years

雨总量的相关。可以发现, 江南春雨总量与前期11月~2月AAO有较显著的负相关, 与郑菲和李建平(2012)结果一致, 前冬南半球环状模的异常能引起南半球中高纬海温异常并且持续到春季, 进而引起华南区域大气环流异常从而影响降水; 与Nino3.4从前一年7月开始就存在较显著的正相关, 且持续到同期, 这与第4节关于前冬热带东太平洋海温异常对江南春雨影响的结果一致; 与IOB从前一年12月份开始存在较显著的正相关, 也持续到同期, 其原因可能如Xie et al. (2016)指出, 与东太平洋海温变化相联系的印度洋增暖在赤道印度洋形成东风Kelvin波, 引发低层东风和孟加拉湾北部反气

旋环流异常, 我国南方地区为西南气流控制, 降水充沛。而其他指数的相关信号或短暂、或散乱, 因此本文选择前期冬季AAO、Nino3.4和IOB指数为预测因子, 建立多元线性回归方程, 表达式为

$$y = -2.29 - 7.99 \times X_{IOB} + 67.67 \times X_{Nino3.4} - 64.99 \times X_{AAO} \quad (1)$$

其中, X_{IOB} 是前冬IOB指数, $X_{Nino3.4}$ 是前冬Nino3.4指数, X_{AAO} 是前冬AAO指数, y 是预报的江南春雨总量, 与降水资料的相关为0.76, 通过0.01的显著性检验(图8), 比单用Nino3.4指数相关性(0.69)更高。并且对于极端降水年1982年和2014年, 回归结果能达到±0.5个标准差, 对于不一致

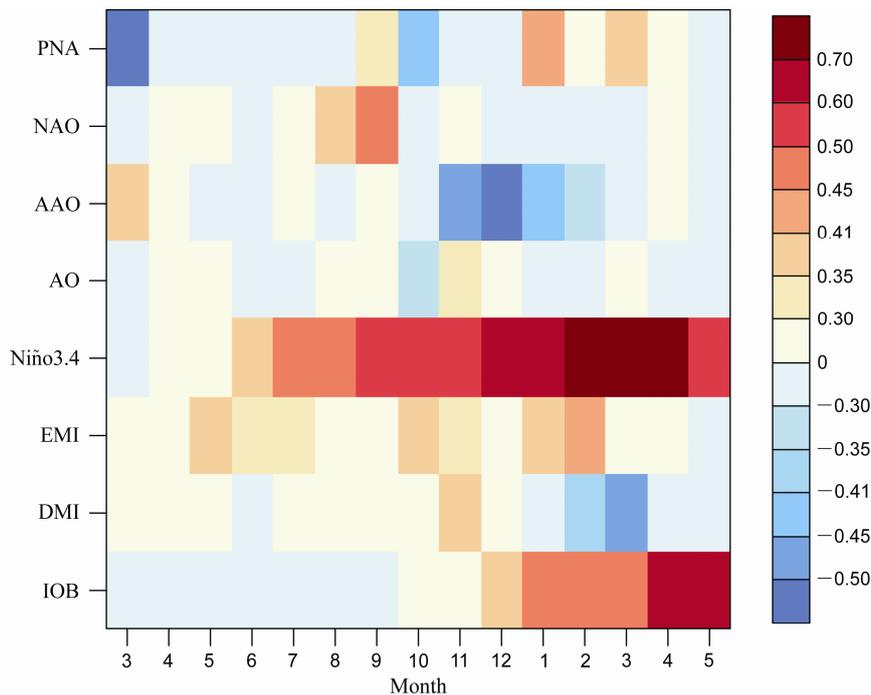


图 10 江南春雨总量与前一年 3 月至当年 5 月太平洋—北美型遥相关指数, 北极涛动指数, 南极涛动指数, 北大西洋涛动指数, El Niño Modoki 指数, 印度洋偶极子指数, 印度洋海盆一致模指数逐月相关系数变化

Fig. 10 Correlation coefficients between total rainfall during SPRJ period and the index of PNA, NAO, AAO, AO, Niño3.4, EMI, DMI, IOB from March of the preceding year to May of current year

的 ENSO 年份, 回归结果与单用 Niño3.4 指数预测相比都有所改善。

6 结论与讨论

本文基于中国地面降水逐日 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点数据集 (V2.0)、JRA55 再分析资料和 NOAA 逐日向外长波辐射资料以及逐月 OISST 资料, 定义并计算了逐年江南春雨的开始时间、结束时间和江南春雨总量, 分析了其气候特征、年际变化和影响年际变化的前期信号及影响的物理过程, 考察了 Niño3.4、EMI、DMI、IOB、AO、AAO 等信号与江南春雨总量的超前一同期相关。研究表明, 前期冬季主要的信号来自赤道东太平洋。Niño3.4 区海温正异常激发的异常 Walker 环流下沉支位于海洋大陆, 增强了菲律宾异常反气旋, 对流层低层从南海到江南地区的西南风增强, 有利于向江南地区输送水汽; 同时孟加拉湾北部的反气旋环流异常, 也增强了江南地区的水汽输送。对流层上层, 江南地区 200 hPa (急流南侧) 存在西风异常, 高层辐散增强, 使得上升运动进一步增强, 进而降水增多。

另外本文发现, 前冬 El Niño 强的年份, 海温

异常信号能持续到春季, 江南春雨总量通常偏多, 江南春雨指数与 Niño3.4 指数符号一致; 前冬 El Niño 较弱的年份, 海温异常到春季变弱甚至相反, 江南春雨总量偏少, 与 Niño3.4 指数符号不一致; 而 La Niña 年份没有这个规律。并且基于前期 La Niña 信号的春雨预测相比 El Niño 情形存在更高可预报性。为提高预测的准确性, 本文还加入前期冬季的 AAO 和 IOB 指数, 建立了多元线性回归方程, 显示出比单一的 Niño3.4 指数更高的季节预测技巧。

本文结果是基于诊断研究结果, 还需要设计数值试验对前期热带海温异常影响次年江南春雨的相关物理过程进行验证, 对于 ENSO 与降水异常不一致的特殊年份 (1985 和 1987 年) 的原因还需要进一步探讨。

参考文献 (References)

- 包澄澜. 1987. 中国天气学 [M]. 北京: 海洋出版社, 269pp. Bao Chenglan. 1987. Synoptic Meteorology in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Ocean Press, 269pp.
- 陈丹, 朱克云, 布和朝鲁. 2012. 前期印度洋海温异常对中国春季降水

- 的影响 [J]. 成都信息工程学院学报, 27 (5): 479–484. Chen Dan, Zhu Keyun, Buhe Cho-law. 2012. The influence of the preceding SST of Indian Ocean on the spring precipitation in China [J]. J. Chengdu Univ. Inform. Technol. (in Chinese), 27 (5): 479–484, doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2012.05.009.
- Chen J M, Li T, Shih C F. 2008. Asymmetry of the El Niño–spring rainfall relationship in Taiwan [J]. J. Meteor. Soc. Japan Ser. II, 86 (2): 297–312, doi:10.2151/jmsj.86.297.
- 陈绍东, 王谦谦, 钱永甫. 2003. 江南汛期降水基本气候特征及其与海温异常关系初探 [J]. 热带气象学报, 19 (3): 260–268. Chen Shaodong, Wang Qianqian, Qian Yongfu. 2003. Preliminary discussions of basic climatic characteristics of precipitation during raining seasons in regions south of Changjiang River and its relationship with SST anomalies [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 19 (3): 260–268, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2003.03.005.
- 陈艺敏, 钱永甫. 2005. 西太平洋暖池海温对华南前汛期降水影响的数值试验 [J]. 热带气象学报, 21 (1): 13–23. Chen Yimin, Qian Yongfu. 2005. Numerical study of influence of the SSTA in western Pacific warm pool on precipitation in the first flood period in South China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 21 (1): 13–23, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2005.01.002.
- 程慧萍, 贾晓静. 2014. 印度洋冬季海温异常对中国春季降水的影响 [J]. 高原气象, 33 (3): 733–742. Cheng Huiping, Jia Xiaojing. 2014. Influence of sea surface temperature anomalies of Indian Ocean in winter on precipitation over China in spring [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 33 (3): 733–742, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00024.
- 邓立平, 王谦谦. 2002. 华南前汛期 (4~6 月) 降水异常特征及其与我国近海海温的关系 [J]. 热带气象学报, 18 (1): 45–55. Deng Liping, Wang Qianqian. 2002. On the relationship between precipitation anomalies in the first raining season (April–June) in southern China and SST over offshore waters in China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 18 (1): 45–55, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2002.01.006.
- Feng J, Li J P. 2011. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over South China [J]. J. Geophys. Res., 116 (D13): D13102, doi:10.1029/2010JD015160.
- 高由禧, 徐淑英, 郭其蕴, 等. 1962. 东亚季风的若干问题 [M]. 北京: 科学出版社, 49–63. Gao Youxi, Xu Shuying, Guo Qiyun, et al. 1962. Some Problems about East Asian Monsoon (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 49–63.
- 胡俊. 2014. 青藏高原热力作用和印度洋海盆一致模对东亚夏季风年际变率的协同影响及相互作用 [D]. 中国科学院大气物理研究所硕士学位论文. Hu Jun. 2014. Coordinated impacts of the Tibetan Plateau thermal forcing and Indian Ocean Basin Mode on East Asian summer monsoon and their interactions [D]. M. S. thesis (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. 2015. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics [J]. J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II, 93 (1): 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- 李麦村, 潘菊芳, 田生春, 等. 1977. 春季连续低温阴雨天气的预报方法 [M]. 北京: 科学出版社, 92pp. Li Maicun, Pan Jufang, Tian Shengchun, et al. 1977. The Forecast Method of Spring Persistent Low-Temperature and Rains (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 92pp.
- Liebmann B, Smith C A. 1996. Description of a complete (Interpolated) outgoing longwave radiation dataset [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 1275–1277.
- 马慧, 陈桢华, 姜丽萍, 等. 2009. 华南前汛期降水与我国近海海温的 SVD 分析 [J]. 热带气象学报, 25 (2): 241–245. Ma Hui, Chen Zhenhua, Jiang Liping, et al. 2009. SVD analysis between the annually first raining period precipitation in the South of China and the SST over offshore waters in China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 25 (2): 241–245, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.02.017.
- Mao J Y, Chan J C L, Wu G X. 2004. Relationship between the onset of the South China Sea summer monsoon and the structure of the Asian subtropical anticyclone [J]. J. Meteor. Soc. Japan Ser. II, 82 (3): 845–859, doi:10.2151/jmsj.2004.845.
- 苗秋菊, 徐祥德, 张胜军. 2005. 长江流域水汽收支与高原水汽输送分量“转换”特征 [J]. 气象学报, 63 (1): 93–99. Miao Qiuju, Xu Xiangde, Zhang Shengjun. 2005. Whole layer water vapor budget of Yangtze River valley and moisture flux components transform in the key areas of the Plateau [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63 (1): 93–99, doi:10.11676/qxb2005.010.
- 强学民, 杨修群. 2013. 华南前汛期降水异常与太平洋海表温度异常的关系 [J]. 地球物理学报, 56 (8): 2583–2593. Qiang Xuemin, Yang Xiuqun. 2013. Relationship between the first rainy season precipitation anomaly in South China and the sea surface temperature anomaly in the Pacific [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 56 (8): 2583–2593, doi:10.6038/cjg20130808.
- Reynolds R W, Smith T M, Liu C Y, et al. 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature [J]. J. Climate, 20 (22): 5473–5496, doi:10.1175/2007JCLI1824.1.
- 尚可, 何金海, 朱志伟, 等. 2013. 西太平洋暖池区热含量和海表温度与江南春雨的相关性对比研究 [J]. 地理科学, 33 (8): 986–992. Shang Ke, He Jinhai, Zhu Zhiwei, et al. 2013. Comparison between correlations of heat content and sea surface temperature over western Pacific warm pool with spring persistent rains [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 33 (8): 986–992, doi:10.13249/j.cnki.sgs.2013.08.986.
- 尚可, 詹丰兴, 何金海, 等. 2014. 前期夏季西太平洋暖池热含量对江南春雨的影响及其可能机理 [J]. 海洋学报, 36 (1): 86–97. Shang Ke, Zhan Fengxing, He Jinhai, et al. 2014. Impact of the preceding-summer heat content over western Pacific warm pool on spring persistent rain and its possible mechanism [J]. Acta Oceanol. Sinica (in Chinese), 36 (1): 86–97, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2014.01.010.
- Tian S F, Yasunari T. 1998. Climatological aspects and mechanism of spring persistent rains over central China [J]. J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II, 76 (1): 57–71.
- 万日金, 吴国雄. 2006. 江南春雨的气候成因机制研究 [J]. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 36 (10): 936–950. Wan Rijin, Wu Guoxiong. 2007. Mechanism of the spring persistent rains over southeastern China [J]. Sci. China Ser. D: Earth Sci., 50 (1): 130–144, doi:10.1007/s11430-007-2069-2.
- 万日金, 吴国雄. 2008. 江南春雨的时空分布 [J]. 气象学报, 66 (3): 310–319. Wan Rijin, Wu Guoxiong. 2008. Temporal and spatial distribution of the spring persistent rains over southeastern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66 (3): 310–319, doi:10.11676/

- qxzb2008.029.
- 万日金, 王同美, 吴国雄. 2008a. 江南春雨和南海副热带高压的时间演变及其与东亚夏季风环流和降水的关系 [J]. 气象学报, 66 (5): 800–807. Wan Rijin, Wang Tongmei, Wu Guoxiong. 2008a. Temporal variations of the spring persistent rains and SCS subtropical high and their correlations to the circulation and precipitation of the East Asia summer monsoon [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66 (5): 800–807, doi:10.11676/qxzb2008.073.
- 万日金, 赵兵科, 侯依玲. 2008b. 江南春雨的年际变率及其影响因子分析 [J]. 高原气象, 27 (S): 118–123. Wan Rijin, Zhao Bingke, Hou Yiling. 2008b. Interannual variability of spring persistent rain over southeastern China and its effect factor [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 27 (S): 118–123.
- 吴宝俊, 彭治班. 1996. 江南岭北春季连阴雨研究进展 [J]. 科技通报, 12 (2): 65–70. Wu Baojun, Peng Zhiban. 1996. Progress in persistent rainy processes in spring over areas between South of Changjiang River and North of five ridges [J]. Sci. Tech. Bull. (in Chinese), 12 (2): 65–70.
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. 2016. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review [J]. Adv. Atmos. Sci., 33 (4): 411–432, doi:10.1007/s00376-015-5192-6.
- 叶愈源. 1993. 1992 年江南异常春雨的诊断研究 [J]. 应用气象学报, 4 (S): 118–122. Ye Yuyuan. 1993. A diagnostic study of rainfall anomalies in March of 1992 for the southern China [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 4 (S): 118–122.
- 张博, 钟珊珊, 赵滨, 等. 2011. 春季西太平洋海表面温度对我国江南春雨的影响 [J]. 应用气象学报, 22 (1): 57–65. Zhang Bo, Zhong Shanshan, Zhao Bin, et al. 2011. The influence of the subtropical sea surface temperature over the western Pacific on spring persistent rains [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 22 (1): 57–65, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2011.01.006.
- 张洁, 周天军, 宇如聪, 等. 2009. 中国春季典型降水异常及其相联系的大气水汽输送 [J]. 大气科学, 33 (1): 121–134. Zhang Jie, Zhou Tianjun, Yu Rucong, et al. 2009. Atmospheric water vapor transport and corresponding typical anomalous spring rainfall patterns in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 121–134, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.11.
- 郑菲, 李建平. 2012. 前冬南半球环状模对春季华南降水的影响及其机理 [J]. 地球物理学报, 55 (11): 3542–3557. Zheng Fei, Li Jianping. 2012. Impact of preceding boreal winter Southern Hemisphere annular mode on spring precipitation over South China and related mechanism [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 55 (11): 3542–3557, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.004.
- 周定文, 范广洲, 华维, 等. 2009. 我国春季降水与青藏高原东南部冬季归一化植被指数变化的关系 [J]. 大气科学, 33 (3): 649–656. Zhou Dingwen, Fan Guangzhou, Hua Wei, et al. 2009. Relationship between spring rainfall in China and winter normalized difference vegetation index in the southeast of Tibetan Plateau [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 33 (3): 649–656, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.20.